



지식을 요구하기 때문에 실제로 공학자들이 적용하기에는 어려움이 많았다. 반면 공학적 도구로써 개발된 다구찌 기법은 통계적 지식이 없어도 생산 현장에서 쉽게 적용할 수가 있었다. 다구찌 기법은 다구찌 겐이찌(田口 玄一)박사가 개발한 해석기법으로, 최적화된 인자의 조합을 통한 부분실험(Fractional Factorial Experiment)에 근거한 직교배열표(Orthogonal Array)를 사용함으로써 적은 실험 회수를 통한 전조합실험(Full Factorial Experiment)과 유사한 실험 결과를 얻을 수 있다. 다구찌 기법은 주로 품질 공학에 많이 이용되었으며, 제품의 성능변동이 잡음에 둔감하도록 설계변수의 최적조건을 도출하여 잡음에 최소의 영향을 받는 생산 및 공정조건의 설계로 품질의 안정성을 도모하였다.

따라서 본 연구의 목적은 HST의 부하 특성을 고려한 트랙터의 페달 장치에 요구되는 답력 해석에 대하여, 다구찌 기법을 이용한 설계 인자가 시스템에 미치는 영향을 분석하고, 이를 토대로 설계 인자에 대한 기구 해석을 하고, 시험을 통한 해석에 대한 검증 및 분석함으로써 제한된 설계 조건하의 일련된 최적 설계 방법을 제시하고, 이를 토대로 사용자의 편리성 및 편안함을 고려한 HST 트랙터의 페달 장치를 설계함에 있다.

## 2. HST의 개요

HST(HydroStatic Transmission)는 상대적인 유체의 정특성을 이용하여 저속 고토크의 동력을 전달하며, 일반적으로 무단 변속기를 의미한다. 상대어로서 HDT(HydroDynamic Transmission)는 자동차의 토크 컨버터와 같이 유체의 저토크 고속특성을 이용하여 동력을 전달하게 된다. HST의 주요 특징은 용이한 컨트롤, 무단변속, 정역전성이며, 이러한 특성은 가변 용적 펌프의 사판 조절 기능에 의해서 이루어진다. 사판각이 0° 면 펌프는 회전하나 동력의 전달은 없고, 0° 외의 각도에서는 전진 또는 후진이 이루어진다. 즉 HST는 사판 각도를 조절하여 전진 또는 후진의 조작이 가능하며, 무단변속 기능을 갖기 때문에 주클러치의 조작없이 속도의 변화, 진행 방향 전환이 가능하게 된다.

HST는 사판을 조절하는 방법에 따라 수동식 및 서보식으로 구분된다. 수동식은 사판을 조절하는 축과 페달이 기계적으로 연결되어 있으며, 서보식은 사판을 조절하는 축이 약 40° 이내의 범위에서 유압에 의해 움직인다. 수동식의 경우 제작이 용이하고 비용이 저렴하다는 장점이 있지만, 급발전 및 급정지 방지, 적절한 답력유지 등의 기능 구현이 쉽지 않다는 단점이 있다. Fig.1은 HST 유닛 제조 회사에서 제공하는 부하 특성 곡선으로, 엔진 속도(rpm) 및 HST 내부 압력에 따라 작동시의 부하가 다르다. Fig.1에서 (+) 값은 HST의 중립으로 되돌아가려는 특성을 가지며, (-) 값은 최대 스트로크로 동작하려는 특성을 나타낸다.

## 3. HST 트랙터 페달 장치 설계

앞에서 언급한 바와 같이, HST 유닛의 사판은 페달 장치에 의해 조절된다. 페달 장치를

설계할 때 고려해야 할 사항으로 사용자의 안전을 위한 HST 유닛의 자동 중립 복귀 기능 및 급발진, 급정지 방지 기능을 포함해야 한다. 또한 장시간 사용시의 운전자 피로 감소를 위하여 페달의 적절한 답력 제공, 정속 주행을 위한 크루즈 기능, 그리고 사판의 떨림이 발에 전달되는 것을 방지하는 기능을 포함해야 한다. 이를 구현하기 위하여 HST 트랙터의 페달 장치는 Fig. 2와 같이 주행을 위한 전후진 페달, 스프링, 댐퍼 및 정속 주행을 할 수 있는 전자식으로 구성하였다.

트랙터 주행시 페달에서 발을 제거하면 HST 유닛이 중립으로 복귀하여 브레이크를 밟지 않아도 트랙터가 정지한다. 이러한 자동중립복귀 기능을 구현하기 위하여 캠과 스프링 및 댐퍼를 사용하였으며, 캠의 형상과 스프링 및 댐퍼의 작용력에 따라 페달 답력이 결정된다.

스프링 계수 설정시 고려 사항은 스프링 작용력으로 HST의 부하를 극복하고 중립으로 복귀할 수 있어야 한다. 엔진 속도가 800 rpm이고, HST 내부 유압이 5000psi일 경우에 최대 스트로크로 가려는 힘이 가장 크게 작용하나, 장착 엔진의 성능상 엔진 회전속도는 2850rpm이며, HST 압력이 1000psi의 경우의 부하에 대하여 스프링 계수를 설정하였다.

페달 장치를 설계함에 있어서, 위와 같은 기능과 특성을 고려한 최적 설계를 위하여 기구 해석 프로그램 중 Pro/Engineer에서 제공하는 Pro/Mechanica Motion을 사용하였으며, 각 설계 인자가 전체 시스템에 미치는 영향에 대해서 파악하기 위하여 다구찌 방법을 이용하였다. 다구찌 방법을 사용하기 위해서는 설계 인자(Factor, 설계 변수) 및 수준(Level, 설계치수)을 설정해야 하며, 인자의 개수와 수준에 따라 해석 회수가 정해진다. 3인자 3수준의 모델에 대한 전조합실시법으로 해석을 할 경우에  $3^3$ 회의 해석이 필요하지만, 다구찌 방법을 이용한 부분조합실시법으로 할 경우  $L_9(3^4)$  직교배열표를 이용하여 총 9회의 해석을 수행하면 된다. 이와 같이 직교배열표를 사용하면 실험 회수를 줄일 수 있을 뿐만 아니라, 하나의 인자에 대한 효과를 구할 때 각 수준의 빈도가 모두 동일하여 다른 인자의 영향에 대하여 치우침이 없다.

페달 답력과 관련된 설계 인자는 페달의 링크 길이, 스프링 및 댐퍼의 계수, 그리고 캠 형

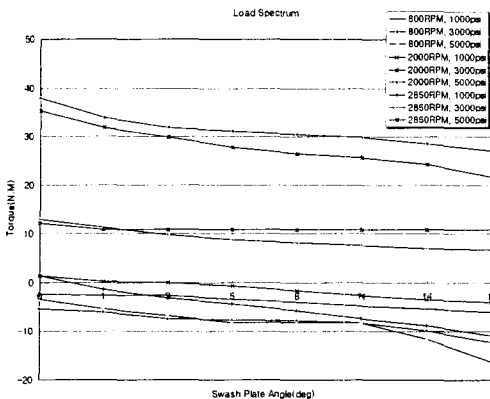


Fig.1 Load Spectrum of the HST Unit

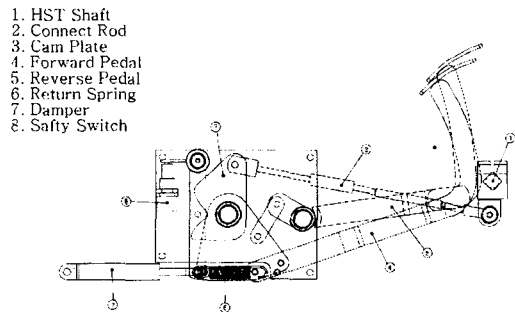


Fig.2 Pedal System of the HST Tractor

상이 있다. 페달 링크는 길수록 작은 답력을 요하지만, 공간적 제약이 따른다. 스프링 계수는 위에서 설명한 바와 같이 HST 유닛과 엔진의 특성을 고려하여 결정하였다. 또한 댐퍼 계수는 트랙터의 급발전, 급정지와 관련되기 때문에 제동시간을 고려하여 결정하였다.

따라서 본 논문에서는 페달 답력과 관련한 설계 인자에 대하여 캠의 형상과 관련된 형상 (X, Y)과 형상 라운드(R)를 인자로 결정하였으며, 3수준을 설정하였다. 수준을 너무 낮으면 수준사이의 경향을 쉽게 예측할 수 없는 단점이 있고, 수준이 너무 높으면 수준과 수준 사이의 경향 예측은 쉬우나 실험 회수가 너무 많아진다는 단점이 있다. 결정된 인자와 수준을 이용하여  $L_9(3^4)$  직교배열표를 사용하여 Table 1과 같이 나열하였다.

직교배열표에 나열한 조건에 따른 실험 결과에 대하여 특성치 분석을 하는데 목적에 따라 망소특성(Smaller-the-Better Type), 망목특성(Nominal-the-Best Type), 망대특성(Larger-the-Better Type)의 세가지 형태로 나누어진다. 망소특성은 구하고자 하는 성능 특성치가 작을수록 유리하고, 망목특성은 목표치에 근접할수록 좋다. 또한 망대특성은 성능 특성치가 클수록 유리하다. SN비(Signal to Noise Ratio)는 성능특성치가 목표값 주위에 최소한의 산포를 가지면서 분포할 수 있도록 수식으로 나타낸 것으로써, SN비가 높을수록 목표값에 근접하게 된다. 식(2)~식(4)는 각 목적함수에 따른 SN비를 구하는 식으로서, 순서대로 망목특성, 망소특성, 망대특성에 대한 식이다.

$$\bar{y} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n y_i, S_m = \frac{1}{n} \left( \sum_{i=1}^n y_i \right)^2 \cdot v. = \frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2 \quad (1)$$

$$SN = 10 \log \left[ \frac{\frac{1}{n} (S_m - V_e)}{V_e} \right] \quad (2)$$

$$SN = -10 \log \left[ \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n y_i^2 \right] \quad (3)$$

$$SN = -10 \log \left[ \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \frac{1}{y_i^2} \right] \quad (4)$$

본 논문에서 이용하는 목적함수는 페달 답력이 작을수록 유리한 망소특성이다. 직교배열표에 나열한 조건에 따른 해석 결과를 이용하여 각 인자별 시스템에 미치는 영향을 분석한

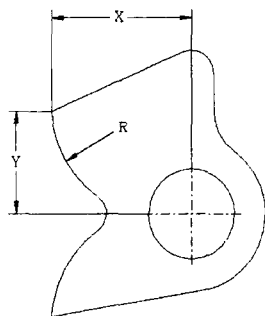


Fig.3 Design Factor of the Cam Shape

Table 1. Orthogonal Array of Design Factor

Orthogonal Array ( $L_9 3^4$ )			
Factor/Level	X	Y	R
1	47	30	40
2	47	35	44
3	47	40	48
4	52	30	44
5	52	35	48
6	52	40	40
7	57	30	48
8	57	35	40
9	57	40	44

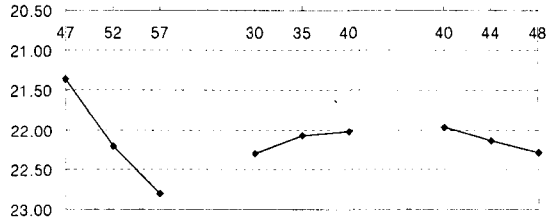


Fig.4 SN Ratio about Design Factor

SN비를 Fig. 4에 나타내었다. 인자별 수준에 대한 경향을 살펴보면, 캠 형상의 X와 라운드 R 인자는 1수준일수록, Y는 3수준일수록 SN비가 높다. 또한 인자별 시스템에 미치는 영향은 X가 67%, Y는 13%, R이 15%이다. 따라서 캠 설계시 수준별 영향이 큰 X인자는 1수준을 선택하는 것이 좋으며, 영향이 작은 Y와 R 인자는 1수준을 선택하되 설계 조건을 고려하여 다른 수준을 선택해도 무방하다. 본 논문에서는 페달 장치의 정확한 중립 복귀 위치와 복귀 시간을 고려하여 X인자는 1수준을 Y와 R인자는 2수준을 선정하였다.

인자별 시스템에 미치는 영향 중에서 교호작용에 의한 비율은 5%이며, 비율이 클수록 인자간의 간섭이 많으며 인자별 SN비를 정확히 알 수 없으며, 잘못된 인자 선택이라고 볼 수 있다. 또한, Fig. 4의 인자에 대한 수준 그래프 경향이 산(∧)이나 골(∨) 모양일 경우에는 수준의 범위 설정에 따라 경향이 다르게 나올 수 있으므로 재현성 확보의 어려움이 있다.

Fig. 5는 다구찌 기법을 이용한 캠 형상의 치수와 스프링 부착 위치에 대한 설계 인자를 사용하여 해석한 트랙터 페달 답력의 한 예를 나타낸 것이다.

#### 4. HST 트랙터 페달 장치에 대한 시험 검증

HST 유닛의 부하 특성은 위 Table 1에서 살펴본 바와 같이 엔진 속도 및 HST 유닛의 내부압력에 따라 다르므로, 엔진 속도 및 HST 유닛의 내부 압력 변화 따르는 답력을 측정하였다. HST 유닛의 전후진 테스트 포트에 압력센서를 부착하고, 전후진 페달에 답력 센서를 부착하였다. 시험 조건은 엔진 속도가 각각 2000, 2850(max)rpm인 상태에서 HST 유닛

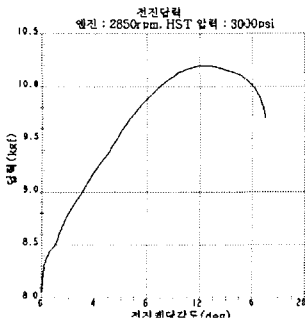


Fig. 5 Result of Analysis

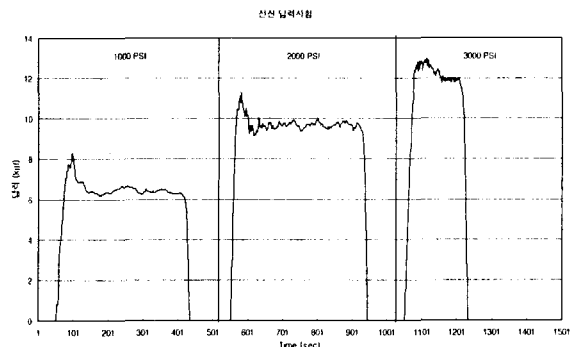


Fig.6 Pedal Force Test

의 내부 압력이 1000, 2000, 3000psi가 되도록 Dynamometer에 장착하여 휠에 부하를 가하여 HST 유닛의 압력을 변화시켰다. HST 유닛의 내부 압력이 3000 psi 이상 올라가면 장착된 엔진의 성능 특성상 때문에 동작하지 못하고 정지한다. Fig. 6은 페달 답력 시험 결과를 나타낸 것으로, 실험으로 측정된 답력이 해석 결과보다 2~3 kgf 정도 더 크게 측정이 되었다. 그 이유로는 실험시 HST unit의 내부압력을 일정하게 유지할 수 없으며, 또한 측정된 답력은 페달을 이상적인 힘이 아닌 필요 답력 이상으로 밟기 때문으로 추정할 수 있으며, 이 답력이 실제로 사용자가 느끼는 답력이라 할 수 있다.

## 5. 결론

빈번한 변속 및 전후진 방향 전환을 요구하는 작업에 필요한 HST 트랙터에 대하여 장착된 HST 유닛에 대한 부하특성을 고려한 페달 장치 설계시 다구찌 기법을 이용하여 설계 인자가 시스템에 미치는 영향을 파악한 후, 해석 프로그램을 이용한 최적설계를 통하여 설계하였으며, 시험을 통한 검증을 하였으며 다음과 같이 요약할 수 있다.

- 1) HST 유닛에 대한 부하특성을 고려한 페달 장치의 최적 설계를 하여 트랙터 주행에 필요한 페달 답력을 줄임으로써 사용자의 피로감을 덜 수 있었다.
- 2) 사용자가 페달을 밟지 않았을 때 HST 유닛이 중립으로 자동 복귀하므로써, 돌발 상태를 제외한 트랙터 정지시 별도의 브레이크를 밟지 않아도 되지 않는다.
- 3) 댐퍼를 사용하여 급발진 및 급정지를 방지하고, HST 유닛 특성상 사판의 떨림을 사용자의 발에 전달되지 않도록 방지하였다.
- 4) 전자석을 이용한 크루즈 컨트롤 시스템을 제공함으로써, 일정 속도로 운전시 운전자가 편리하게 조작할 수 있다.
- 5) 다구찌 기법을 이용하여 각 설계 인자가 전체 시스템에 미치는 영향을 분석하고 이를 이용하여 제약 조건을 고려한 제품에 대한 최적 설계를 할 수 있는 방법을 제시하였다.

## 참고문헌

1. 田口玄一, “개발설계단계의 품질 공학”, 한국공업표준협회, 1991.
2. 田口玄一, “품질설계를 위한 실험계획법”, 한국공업표준협회, 1991.
3. 오재웅, 차경준, 이근태, 진정언, “다구찌 방법과 실험계획법을 이용한 소음기의 설계 방법”, 한국자동차공학회논문집 제7권 제5호, pp.121~129
4. 이권희, 박경진, “제한조건이 있는 문제의 이산설계공간에서의 강건최적설계”, 대한기계학회논문집 A권, 제22권, 제5호, pp.728~737
5. Pro/MECHANICA Motion 매뉴얼